

Jak získat energii z černé díry?

Artem Gorodilov¹

¹Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita

Abstract

Tento článek se zabývá potenciálním zdrojem energie pro vyspělé mimozemské civilizace, zejména ty, které jsou klasifikovány jako typ III na Kardaševově stupnici. Primárně se zaměřuje na fyzikálně podložený přístup: využití energie z BH. Studie pojednává o modelu získávání energie z BH zvaném Penroseův stroj v rámci obecné teorie relativity. Výsledky naznačují, že BH by mohla sloužit jako výkonný a udržitelný zdroj energie pro civilizace, které se snaží rozšířit svůj vliv napříč galaxiemi.

Introduction

Jak lze uspořádat ekonomiku mimozemských civilizací, aby získávaly energii na dobývání nových a nových galaxií? Můžeme spekulovat o tachyonových generátorech, konvertorech energie z vesmíru s odlišnou fyzikou nebo o velké peci spalující temnou hmotu. Pokud však k otázce přistoupíme realističtěji, aniž bychom vymýšleli zcela exotické entity, budeme muset každou hvězdu stočit do Dysonovy sféry [1]? Ve skutečnosti existuje tak účinný mechanismus výroby energie, který by byl hoden civilizace úrovně 3 na stupnici Kardasheva [2]. A zrojem této energie by byla černá díra (ČD)

Fyzika černých děr

Statická nerotující černá díra

Skutečnou ČD se zatím nikomu nepodařilo vytvořit v experimentálním zařízení na Zemi. Proto hovoříme o jejich modelování na základě Obecné Teorie Relativity (OTR). Existují různé modely. První a nejjednodušší z nich se objevil téměř ihned po Einsteinově zveřejnění OTR v letech 1915-1916 a jeho autorem je německý fyzik Karl Schwarzschild. Ten se rychle chopil matematického aparátu nové teorie a rychle našel první přesné řešení Einsteinových rovnic [3].

Řešením byla nejjednodušší, nerotující a beznábojová ČD. Tedy nějaká oblast, v níž je prostor deformován do té míry, že únik z ní by vyžadoval nadsvětelnou rychlost. Hranice této oblasti se nazývá horizont událostí a je definována Schwarzschildovým poloměrem:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Schwarzschildovu metriku pro nerotující nenabitou ČD ve standardních Schwarzschildových souřadnicích (t, r, θ, ϕ) ukazuje rovnice (1). Prvek přímký je uveden v rovnici (2).

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -\left(1 - \frac{2GM}{r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{2GM}{r}\right)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (2)$$

Později se ukázalo, že ČD není jen matematická hračka. Když se masivní hvězda po spotřebování vodíku zhroutí a exploduje v supernově. Při určité kombinaci počáteční hmotnosti hvězdy a hmotnosti zbytku po výbuchu supernovy (viz tabulka (1)). se komprese hvězdy nemůže zastavit a podle všeho by se měla celá nacházet v samotném středu ČD, v místě, kde by teoreticky měla být nekonečná hustota a nekonečné zakřivení prostoru a času. Takovému bodu se říká singularita. Ukazuje se, že horizont událostí je jakousi podmíněnou hranicí černé díry. Poloměr, při kterém je úniková rychlost rovna rychlosti světla.

Nestatická rotující černá díra

Schwarzschildova ČD je přitom poněkud zjednodušený model. S největší pravděpodobností ve vesmíru žádné takové ideální ČD neexistují. A důvodem je rotace hvězd. Slunce vykoná úplnou otáčku kolem své osy přibližně za 25.67d (na rovníku). Hmotnější hvězdy rotují ještě rychleji a právě hmotné hvězdy jsou kandidáty na roli budoucích černých děr. Když se tyto hvězdy zhroutí, jejich rychlost rotace se mnohonásobně zvýší. To je důsledek zákona zachování hybnosti. Například: kdyby se Slunce smrško na svůj Schwarzschildův poloměr $\approx 3\text{km}$, přičemž by si plně zachovalo svůj točivý moment, otáčelo by se rychlostí až 1000 otáček

Table 1: Vývoj hvězd podle jejich hmotnosti

Počáteční hmotnost hvězdy [M_{\odot}]	Hmotnost zbytku (jádra) [M_{\odot}]	Konečné stádium
< 8	—	Bílý trpaslík
$8 - 20$	$1.4 - 3$	Neutronová hvězda
$20 - 40$	> 3	Černá díra
> 40	Úplný kolaps	Černá díra (přímý kolaps)

za sekundu a rychlost na rovníku by činila asi 45% rychlosti světla.

Ukazuje se, že ČD vzniklé při kolapsu hvězd by měly rotovat, a to poměrně rychle. Co přesně se ale v ČD otáčí? Vždyť mluvíme o nekonečně malém bodě v prostoru, co s tím má společného rotace? ČD je popsána pouze třemi parametry: hmotností, hybností a elektrickým nábojem. Hybnost je právě zodpovědná za rotaci a podle zákona zachování energie - všechny tyto veličiny se musí zachovat, takže ČD musí zdědit hybnost od mateřské hvězdy.

Řešení rovnic OTR se podařilo získat až téměř 50 let po Schwarzschildově úspěchu. Podařilo se to v roce 1963 Royi Kerrovi [4]. Kerrovu metriku v Boyerových-Lindquistových souřadnicích (t, r, θ, ϕ) představuje vzorec (3).

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{r} \right) dt^2 - \frac{4GMa \sin^2 \theta}{\Sigma} dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2GMa^2 r \sin^2 \theta}{\Sigma} \right) \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (3)$$

kde

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad \Delta = r^2 - 2GMr + a^2.$$

Rotace ČD činí matematiku pro výpočet mnohem složitější a fyzika rotující ČD se stává mnohem rozmanitější. Již v době Schwarzschilda byl v OTR znám jeden jev související s rotací těles. Prvním pozorovacím potvrzením teorie byla precese dráhy Merkuru. Perhelium Merkuru se neustále posouvalo. To se obvykle přisuzuje gravitačnímu vlivu jiných nebeských těles. Astronomové se dokonce pokusili hledat planetu uvnitř Merkurovy dráhy a pojmenovali ji Vulkán [5]. Řešení však našel až Einstein v roce 1915 jako součást OTR. Ukázalo se, že podle OTR rotující tělesa unášejí prostor a ten se podobně jako vír stáčí ve směru rotace tělesa. Tento jev se nazývá Lense-Thirringův efekt [6]. Vizuální znázornění je uvedeno na obrázku (1).

Statické ČD jsou sféricky symetrické. Rotující objekty jsou naopak v rovníkové oblasti roztážené. Tomuto efektu podléhá i horizont událostí (HU) rotující

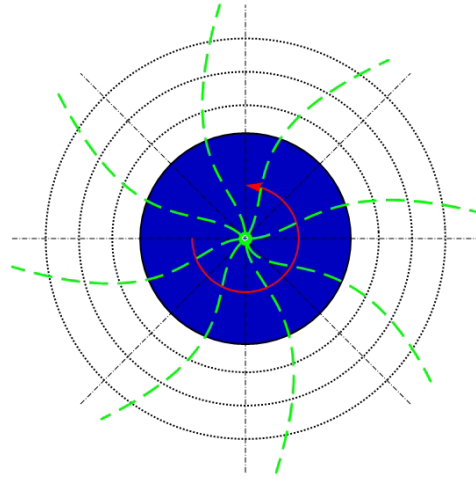


Figure 1: Diagram of Frame-dragging effect. Source: Zhang et al. [7].

ČD, který se podobá rotačnímu elipsoidu. Taková ČD musí mít ještě jednu důležitou plochu, která se nazývá statická limita. Je to hranice prostoru, uvnitř které těleso nemůže zůstat pro vnějšího pozorovatele v klidovém stavu. V této oblasti se těleso nevyhnutelně stočí do víru časoprostoru v napětí rotace ČD. V nerotující ČD se HU a limita statičnosti shodují. V rotující ČD se dotýkají na pólech. Oblast mezi statickou limitou a HU se nazývá ergosféra (viz obrázek (2)).

Penroseův stroj

Jakmile se dostanete za HU, není cesty ven. Je však zcela reálné dostat se do ergosféry a vrátit se zpět. V tomto smyslu funguje jako kolotoč: pokud se k němu připojíte a pak se od něj včas odpojíte, můžete získat dodatečnou energii díky rotaci přenesením točivého momentu rotace. Současně se zpomaluje i samotná ČD. A to je právě ten princip získávání energie.

V roce 1969 popsal matematik Roger Penrose zajímavou vlastnost Kerrovy ČD [9]. Ukázalo se, že k opuštění ergosféry není nutné na ni působit obrovskou energií. Stačí správně použít zákon zachování hybnosti. Představme si, že nějaké těleso, které dopadne do ergosféry, se tam rozpadne na dvě části: jedna část spadne pod HU a je pohlcena ČD a druhá část se

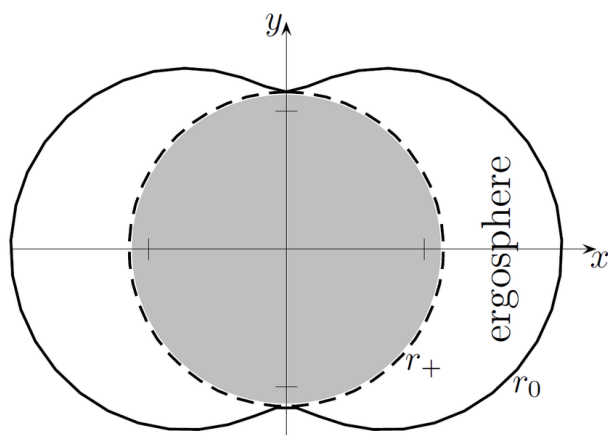


Figure 2: Event horizon r_+ and ergosphere r_0 of a rotating Kerr Black Hole. Source: Scharpf [8].

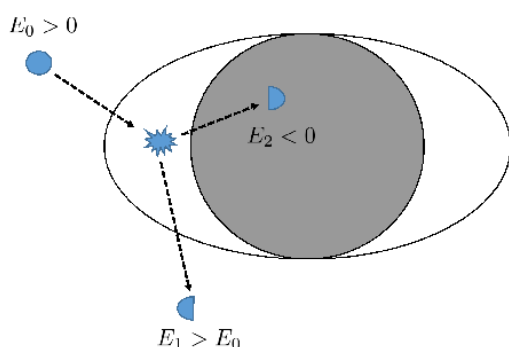


Figure 3: The Penrose Process. Source: Brito, Cardoso, and Pani [10].

podle zákona zachování hybnosti odrazí zpět a vyletí z nejbližšího okolí ČD. Pokud se tato druhá část pohybuje dostatečnou rychlostí a ve směru rotace ČD, získá dodatečnou energii a hybnost v důsledku rotace samotného časoprostoru v ergosféře. Na těleso se přenáší hybnost ČD. Těleso zrychluje a rotace ČD se zpomaluje. Tento proces se nazývá Penroseův proces (viz obrázek (3)).

Zde přichází nejjednodušší myšlenka generátoru založeného na Penroseově procesu, takzvaného Penroseova stroje. Je popsán v Misner, Thorne, and Wheeler [11]. Představme si jednoduchý mechanismus Penroseova stroje v podobě soustavy vozíků vhazujících odpadky do ČD (viz obrázek (4)). Předpokládejme, že máme železniční plošinu, která se pohybuje po kruhové dráze kolem rotujícího ČD a nachází se v jeho ergosféře. Na plošině jsou vozíky s nákladem, které se mohou oddělit a část nákladu vyhodit dovnitř HU. Když se vozík přiblíží k HU, rozdělí se na dvě části: jeden vozík vyvrhne trosky

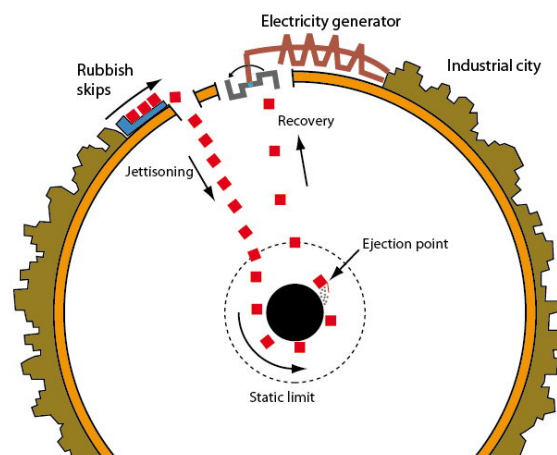


Figure 4: Industrial extraction of energy from a black hole. Source: The Warped Science of Interstellar (4/6) : Time dilation and Penrose process.

dovnitř HU a druhý je od ní odstráněn v opačném směru. V ergosféře existuje oblast, kde částice může mít zápornou energii vzhledem k pozorovateli v nekonečnu. To znamená, že pokud úlomky narazí do ČD se zápornou energií, ČD ztratí část své rotační energie. Druhý vozík při tom získá dodatečnou energii a zrychlí se, takže opustí ergosféru s větší rychlostí, než měl původně. V důsledku toho pozorovatel v nekonečnu uvidí, že soustava získala dodatečnou energii v důsledku rotace ČD, aniž by jí byla dodána energie z vnějšího zdroje. Je tedy možné periodicky vypouštět vozíky s nákladem, vyhazovat část jejich hmotnosti dovnitř HU a získávat tak další a další urychlené vozíky.

Discussion

Využití ČD jako zdroje energie představuje pro vyspělé civilizace fascinující možnost. Teoretické modely, včetně Penroseova procesu, naznačují, že rotující ČD mohou poskytovat značné energetické výnosy. Zatímco experimentální vytvoření ČD na Zemi zůstává nedosažitelné, jejich astrofyzikální protějšky nabízejí přirozené prostředí pro získávání energie. Jednou z hlavních výzev je efektivní zachycení a přeměna získané energie do využitelné formy bez nadměrných energetických ztrát.

Navíc konstrukce struktur, jako jsou Dysonovy sféry kolem ČD, představuje značnou technickou a materiálovou výzvu. Diskuse se rovněž dotýká důsledků takových energetických systémů pro mezihvězdnou expanzi, zejména ve světle potenciálních omezení vyplývajících z termodynamiky a kvantových efektů. Tato studie nakonec zdůrazňuje potřebu dalšího výzkumu fyziky ČD a jejich technologických aplikací, jakož i širší důsledky pro detekci

vyspělých mimozemských civilizací prostřednictvím jejich energetických stop.

[11] C.W. Misner, K.S. Thorne, and J.A. Wheeler. *Gravitation*. Gravitation v. 3. W. H. Freeman, 1973. ISBN: 9780716703440. URL: <https://books.google.cz/books?id=w4Gigq3tY1kC>.

References

- [1] Freeman J. Dyson. "Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation". In: *Science* 131.3414 (June 1960), pp. 1667–1668. DOI: 10.1126/science.131.3414.1667.
- [2] N. S. Kardashev. "Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations." In: *Soviet Astronomy* 8 (Oct. 1964), p. 217.
- [3] K. Schwarzschild. "On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory". In: *arXiv e-prints*, physics/9905030 (May 1999), physics/9905030. DOI: 10.48550/arXiv.physics/9905030. arXiv: physics / 9905030 [physics.hist-ph].
- [4] Roy P. Kerr. "Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics". In: *Physical Review Letters* 11.5 (Sept. 1963), pp. 237–238. DOI: 10.1103/PhysRevLett.11.237.
- [5] Galina Weinstein. "Einstein, Schwarzschild, the Perihelion Motion of Mercury and the Rotating Disk Story". In: *arXiv e-prints*, arXiv:1411.7370 (Nov. 2014), arXiv:1411.7370. DOI: 10.48550/arXiv.1411.7370. arXiv: 1411.7370 [physics.hist-ph].
- [6] Herbert Pfister. "On the history of the so-called Lense-Thirring effect". In: *General Relativity and Gravitation* 39.11 (Nov. 2007), pp. 1735–1748. DOI: 10.1007/s10714-007-0521-4.
- [7] Li-dong Zhang et al. "Constraints on Covariant Horava-Lifshitz Gravity from precision measurement of planetary gravitomagnetic field". In: *arXiv e-prints*, arXiv:2410.09429 (Oct. 2024), arXiv:2410.09429. DOI: 10.48550/arXiv.2410.09429. arXiv: 2410.09429 [gr-qc].
- [8] Philipp Scharpf. "Simulation and Visualization of Gravitational Waves from Binary Black Holes". PhD thesis. University of Konstanz, Germany, June 2017.
- [9] R. Penrose. "'Golden Oldie': Gravitational Collapse: The Role of General Relativity". In: *General Relativity and Gravitation* 7 (July 2002), pp. 1141–1165. DOI: 10.1023/A:1016578408204.
- [10] Richard Brito, Vitor Cardoso, and Paolo Pani. *Superradiance. New Frontiers in Black Hole Physics*. Vol. 971. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-46622-0.